

MEDIDAS «IN SITU» EN UNA PRESA

Ing. I. S. T. J. LAGINHA SERAFIM

Ing. I. S. T. M. GUERREIRO

RESUMEN

Una vez construida una presa, el conocimiento de su seguridad se basa en la observación de su verdadero comportamiento, a punto de permitir una comparación con las hipótesis usadas en el proyecto. Por eso, las mediciones realizadas *in situ* en las cimentaciones de las grandes presas, y su estudio, son de la mayor importancia, como se pone de relieve en este trabajo.

Se comparan distintos métodos para la medida de desplazamientos, incluyendo los métodos geodésicos y topográficos y los péndulos invertidos. Además se señala la importancia de medir giros, deformaciones unitarias y deslizamientos. Las técnicas y aparatos empleados por los autores para la medida de las magnitudes citadas son descritos resumidamente.

El control, a lo largo del tiempo, de las características mecánicas del macizo rocoso de cimentación y del comportamiento de la cimentación durante el período de construcción de la presa son también señalados.

1. INTRODUCCION

En otro trabajo publicado (1) se ha puesto de relieve el conocimiento del comportamiento mecánico del macizo rocoso afectado por presas de hormigón y sus embalses. En él se indican las razones más importantes y relacionadas con las presas que han motivado la necesidad de un mayor estudio sobre el comportamiento de los macizos rocosos. Entre estos estudios, son de la mayor importancia los relativos a ensayos en modelo, a ensayos *in situ*, a teorías establecidas sobre diferentes hipótesis básicas y a la observación del comportamiento de las cimentaciones de las presas.

De los estudios citados se cree que los relativos a la auscultación de la cimentación de presas son, probablemente, los que merecen más atención y esfuerzo, no obstante la gran importancia de todos ellos. En efecto, una vez construida una presa es a través de los datos de su auscultación que se obtiene el conocimiento completo de su comportamiento, y por tanto, la capacidad de juzgar su seguridad. Además, los estudios relativos a la auscultación pueden suministrar la información necesaria para hacer un juicio definitivo sobre el grado de validez de las

10
varias teorías existentes y de las diferentes técnicas de ensayo en modelo reducido. Estos estudios también dan la información que, en definitiva, permitirá una evaluación de la representatividad de los diferentes tipos de ensayo *in situ* en cuanto a la obtención de las características mecánicas del macizo rocoso.

El estudio y desarrollo de la auscultación de cimentaciones de presas están íntimamente ligados a los siguientes aspectos: 1.º nuevas técnicas de auscultación y el perfeccionamiento de las ya existentes; 2.º amplia utilización de las técnicas existentes en las presas futuras y en las construidas, pero no auscultadas; 3.º estudio y análisis de los datos de auscultación; 4.º comparación de la información así obtenida con la obtenida a través de cálculos, ensayos en modelo, ensayos *in situ* y estudios teóricos.

En el noveno Congreso de Grandes Presas se destacó la gran importancia de la auscultación de presas, particularmente de sus cimentaciones. Los informes de los ponentes (2), (3) y (4) reflejan la preocupación y necesidad de desarrollar técnicas adecuadas de auscultación de las cimentaciones, e indican la extremada importancia de obtener un mayor conocimiento de su comportamiento.

De una manera resumida se indicarán en este trabajo técnicas usadas por los autores para controlar y estudiar el comportamiento mecánico de la cimentación de presas. El problema del comportamiento hidráulico no será tratado en este trabajo. En otros trabajos (5) y (6) se ha tratado aquel tema, asimismo técnicas y resultados de auscultación (7).

2. MEDICION DE DESPLAZAMIENTOS POR LOS METODOS GEODESICOS Y TOPOGRAFICOS

En la casi totalidad de las presas, en cuyo trabajo de auscultación han intervenido los autores, se han utilizado los métodos geodésicos y topográficos.

El clásico método geodésico de triangulación y las técnicas generalmente seguidas para su aplicación están descritas en otros trabajos (8) y (9). Es bien sabido que para la aplicación de este método de medida de desplazamientos de puntos del paramento de aguas abajo de las presas o del terreno se requiere la determinación de los desplazamientos de los pilares de observación. De esta

suerte, la aplicación del método clásico de triangulación implica siempre el conocimiento de los desplazamientos de algunos puntos del terreno próximos a la presa. Este método se ha utilizado para la medición de desplazamientos de otros puntos del terreno próximos a la superficie de la cimentación, particularmente en la base del zócalo de presas bóveda, y en la base de bloques de presas de gravedad de perfil triangular y de contrafuertes.

Actualmente, cuando en el proyecto de una presa se prevén galerías horizontales penetrando en la cimentación, conviene proyectarlas para hacer posible la medición de los desplazamientos usando el método de poligonación (10), en vez del método de triangulación. Por el método de poligonación, los desplazamientos horizontales absolutos de la presa se pueden obtener en mayor número de puntos y más rápidamente, ya que la poligonación debe penetrar en la cimentación lo suficiente como para ir hasta puntos fijos. El método de poligonación permite una mayor exactitud que el método de triangulación, ya que la experiencia ha demostrado que los desplazamientos medidos por triangulación están influidos por varios factores entre los que pueden incluirse la radiación solar, las ondas térmicas de corto período y la incertidumbre de la inmovilidad de los puntos considerados fijos. Otra ventaja del método de poligonación es que puede usarse con independencia de la rigurosidad del tiempo y de las condiciones climáticas de determinados períodos del día. Además, desde el punto de vista de control de la cimentación, el método de poligonación es más eficaz, puesto que permite controlar mucho más puntos, es decir, todos los pertenecientes a la parte de la poligonal, dentro de la cimentación. Las ventajas mencionadas llevaron a recomendar la utilización del método de poligonación en la presa de Almendra, actualmente en construcción en España.

La medición de desplazamientos horizontales por el método de poligonación puede conjugarse con la de los desplazamientos verticales de los mismos puntos, por medio de nivelación de alta precisión (11). Esto permite obtener, por tanto, los desplazamientos totales de los puntos de la cimentación.

Siendo la nivelación una operación simple, y que puede ampliarse con facilidad, es muy adecuada para controlar el comportamiento del macizo rocoso en la zona de la presa, tanto aguas arriba como aguas abajo. Siempre que sea posible conviene unir las dos márgenes a través de nivelaciones a alturas diferentes. La unión puede hacerse sobre la coronación por medio de las nivelaciones hechas en cotas cercanas de la coronación y, a las cotas más bajas, por dentro de las galerías horizontales de la presa con salida al exterior.

3. MEDICION DE DESPLAZAMIENTOS CON EL PENDULO INVERTIDO

La determinación de desplazamientos absolutos de puntos, accesibles por galerías, del interior de la cimentación y de la base de los bloques, se hace actualmente

usando péndulos invertidos. Después de haber experimentado otros dispositivos, los péndulos invertidos se están empleando para obtener desplazamientos de la base de los bloques respecto a puntos profundos de la cimentación.

El primer dispositivo usado fue el péndulo directo penetrando en la cimentación por un pozo. Tiene el inconveniente de que necesita acceso a su punto más bajo, por lo que es necesario que este punto quede en una cámara accesible, cuya inundación por aguas de infiltración es indispensable impedir. Ello es difícil, ocurriendo con frecuencia la inundación.

El sistema de barra de cimentación (una barra instalada en un taladro) fue usado en la presa de Miranda (12), en Portugal. Este dispositivo no tiene los inconvenientes indicados relativamente al sistema anterior. No obstante, la gran longitud de la barra de cimentación reduce substancialmente su insensibilidad a desplazamientos debidos a fuerzas aplicadas en la parte superior, aunque muy pequeñas. No se sabía si esos desplazamientos eran elásticos o, en parte, permanentes. Por eso, las corrientes de aire, así como las operaciones de medición podrían dar lugar a desplazamientos permanentes de la parte superior de la barra de fundación. Ello causaría errores, ya que la parte superior de la barra no debe moverse para que ella transmita el punto fijo desde el fondo del taladro hasta arriba.

Otro dispositivo fue el del hilo de cimentación, descrito en trabajo publicado (13), el cual se usó en la presa de Chicamba, en Mozambique. Este dispositivo no tiene el indicado inconveniente de la barra de cimentación, puesto que la barra es sustituida por un hilo cuyo extremo superior está fijo al bloque. Sin embargo, tiene el inconveniente de que los desplazamientos efectivos son calculados partiendo de desplazamientos medidos, los cuales son muy pequeños respecto a los efectivos, hasta 10 veces menos en algunos casos. El sistema siguiente, es decir, el péndulo invertido, no es muy diferente del hilo de cimentación.

El inconveniente indicado para el hilo de cimentación no existe en el péndulo invertido, puesto que es la totalidad del desplazamiento que se mide directamente. La constitución y descripción del péndulo invertido ya está hecha en otro trabajo (12). El péndulo invertido actualmente utilizado por los autores es semejante al allí descrito, pero con modificaciones relativas a los dispositivos de fijación superior e inferior. Estas modificaciones permiten un montaje más rápido y fácil y una mejor adaptación a la parte del taladro donde son posibles las plomadas.

Un aspecto de importante consideración en el péndulo invertido es la profundidad a que debe quedar el punto de fijación inferior, para poderlo considerar como fijo. Esta profundidad debe determinarse en función de la altura y tipo de presa, de la naturaleza y características mecánicas de la cimentación, y de la geometría del terreno aguas abajo y aguas arriba de la cimentación. Teniendo en cuenta estas condiciones, los autores han utilizado pro-

fundidades comprendidas entre los 20 y 40 metros, según los casos.

Las mediciones de desplazamientos con el péndulo invertido son mucho más rápidas y fáciles que con los métodos geodésicos. Los desplazamientos se miden directamente y requieren muy poco trabajo de gabinete. Es posible, con los péndulos invertidos, mantener un control prácticamente continuo, no requiriendo, para ello, personal altamente calificado, por lo que las mediciones son mucho más económicas. Teniendo presentes estas ventajas se tiende a utilizar menos los métodos geodésicos (2), empleándose en su lugar los péndulos invertidos. Justificadamente se emplea cada vez más el péndulo invertido, tanto en las presas ya construidas (13) como en las que están en construcción (14). En los últimos cinco años, con objeto de medir desplazamientos de puntos de la cimentación, o de las bases de los bloques, los autores han optado por utilizar los péndulos invertidos en los planes de auscultación de varias presas españolas: El Vellón, Valdemouros, Almendra, Cernadilla, El Atazar, Riaño, Gran Suarna, Guara, Campanet, La Baells, Negratín, Las Portas y Santotis.

La figura 1 muestra uno de los péndulos invertidos utilizados en la presa de Cernadilla, con mediciones a cuatro cotas diferentes. Las partes que componen el péndulo invertido (hilo, dispositivos de fijación inferior del hilo, y depósito donde se une el flotador con el dispositivo de fijación superior) y el conjunto instalado en cada cota de medida (base de coordinómetro y su punto de referencia) son mostrados en la figura 1.

Además de las dos componentes horizontales del desplazamiento, el péndulo invertido permite obtener también la componente vertical. Esta componente se puede obtener a través de simples operaciones de nivelación entre un par de escalillas de invar emplazadas, en cada cota de medida, una sobre el hilo y la otra sobre la roca o sobre el hormigón de la base de un bloque. De hecho, el conjunto integrado por el péndulo invertido y las escalillas colocadas sobre él es, en sí mismo, una verdadera escala vertical que comienza en un punto profundo del macizo rocoso. Es obvio que las referencias de esta verdadera escala vertical, es decir, las escalillas de invar, pueden cambiar su posición como resultado del comportamiento del hilo a variaciones de temperatura, a posibles variaciones de tensión y a posibles tensiones exageradas en el hilo que pueden causar fluencia. Las dos últimas circunstancias pueden evitarse muy fácilmente, puesto que se pueden tomar medidas para evitar dar inicialmente al hilo una tensión mayor que el límite elástico, y para evitar variaciones en el nivel del líquido del depósito donde se encuentra el flotador. En cuanto a los cambios de temperatura hay tres posibilidades de tenerlos en cuenta.

La primera consiste en la utilización de hilo invar en lugar de hilo de acero para el péndulo, solución que no corregiría completamente el efecto de los cambios de temperatura y que presentaría en cambio otras dificultades.

La segunda consiste en la utilización de un sistema

independiente de la temperatura. Este podría realizarse siempre y cuando, para cada cota de medida del péndulo, se dispusiera de otro péndulo con hilo del mismo metal y punto de fijación inferior a la misma cota. El segundo péndulo sobrepasaría un poco la cota de medida pasando por un dispositivo que invertiría su sentido y bajaría después un poco por debajo de la cota de medida, quedando tensado por un peso. En la cota de medida ambos péndulos tendrían pequeñas escalas de invar. Como referencia para determinar los desplazamientos se tomaría siempre un índice imaginario situado a media altura de la posición ocupada por los índices de las dos escalillas. Esta posición media es independiente de las variaciones de la temperatura.

La tercera posibilidad consiste en determinar la variación de temperatura del medio ambiente alrededor del hilo en el momento de la medición, permitiendo introducir la corrección correspondiente. Esta técnica, utilizada en la presa de Cambambe, en Angola, resultó muy satisfactoria, a pesar de dar lugar a una corrección del orden de magnitud del desplazamiento vertical.

El coordinómetro utilizado para la medición de los desplazamientos horizontales es un sistema óptico móvil (15). Está en estudio la construcción de un coordinómetro que permita también la medición de la componente vertical del desplazamiento. Este coordinómetro permitirá eliminar la nivelación necesaria para la obtención de aquella componente del desplazamiento. Esto simplificará mucho estas mediciones, permitiendo que se efectúen con la frecuencia usada para las componentes horizontales de los desplazamientos y con el mismo personal. Por ello, las observaciones serán más frecuentes y económicas. Al usar el coordinómetro que mida la componente vertical del desplazamiento, las pequeñas escalas de invar montadas sobre los hilos serán sustituidas por pequeñas marcas grabadas en el hilo, y las escalas de invar colocadas en la roca o en el hormigón de la base de los bloques serán sustituidas por pequeños conos metálicos montados cada uno sobre un perfil de acero anclado en la roca o en el hormigón.

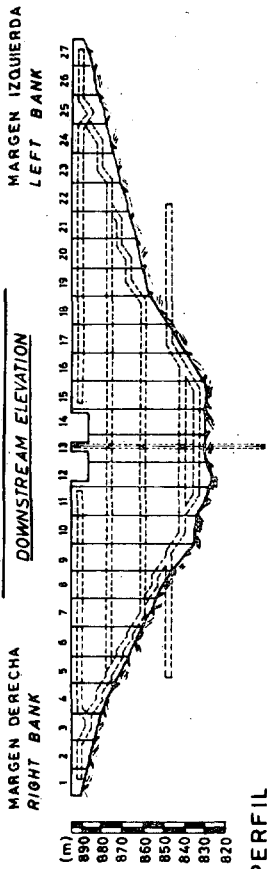
Interesantes resultados de medidas de desplazamientos realizados con péndulos invertidos en la presa de Cambambe han sido presentados en trabajo publicado (16).

4. MEDICION DE GIROS

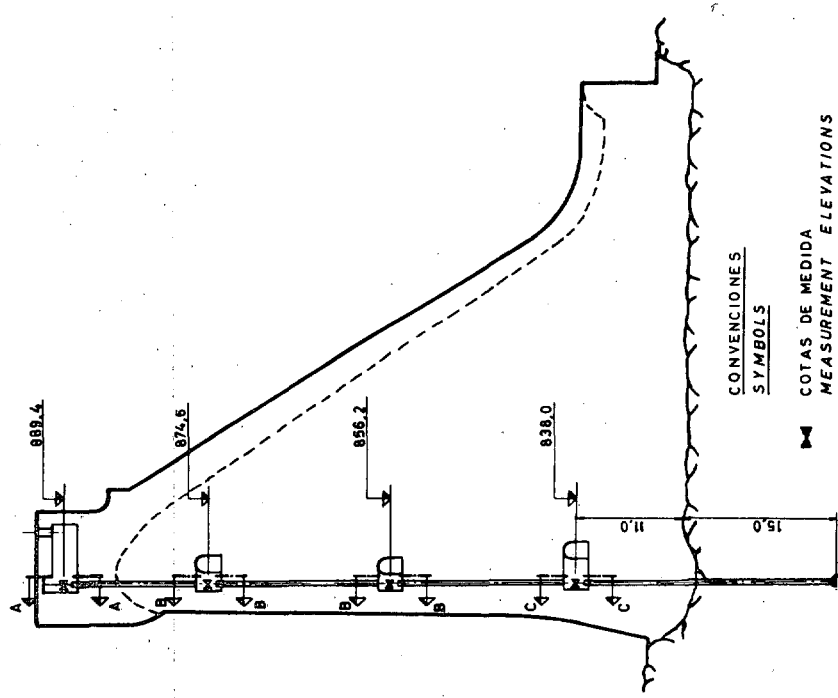
Los giros de la base de los bloques son prácticamente iguales a los correspondientes a la superficie de la cimentación. Las mediciones de los giros son importantes, desde el punto del conocimiento del comportamiento de la cimentación, puesto que complementan las medidas hechas con los péndulos. Además, desde el punto de vista de la seguridad, la medida del giro de la superficie de cimentación de un bloque es de un interés directo.

De hecho, la expresión de Vogt que da el giro α nor-

ALZADO AGUAS ABAJO
DOWNSTREAM ELEVATION



PERFIL
PROFILE

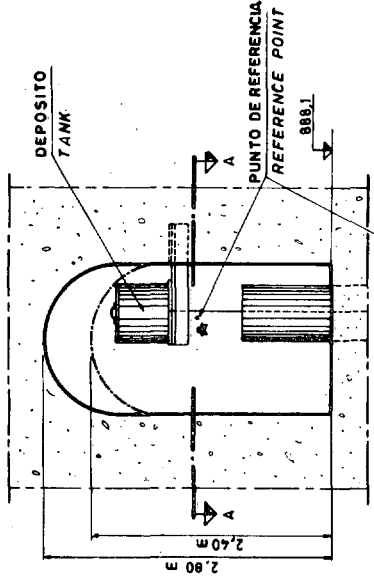


CONVENCIONES
SYMBOLS

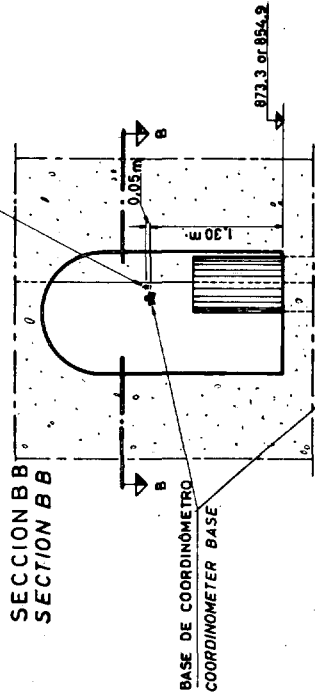
▲ COTAS DE MEDIDA
MEASUREMENT ELEVATIONS

▲ DISPOSITIVO DE FIJACION INFERIOR
LOWER ATTACHMENT DEVICE

SECCION AA
SECTION AA



SECCION BB
SECTION BB



SECCION CC
SECTION CC

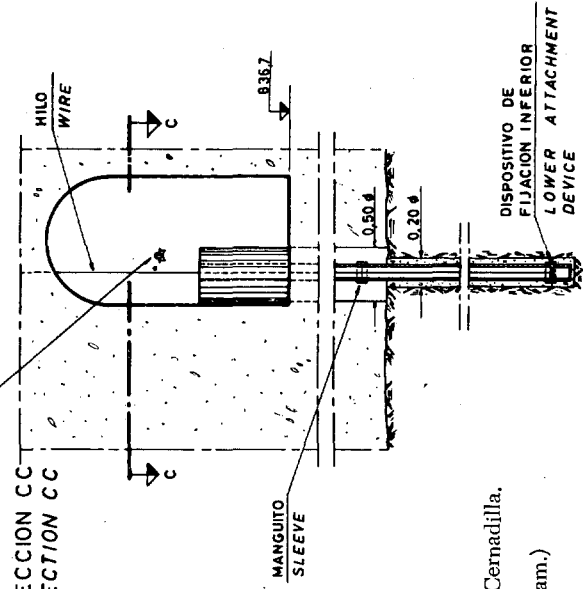


Fig. 1.—Péndulo invertido montado en el bloque central de la presa de Cernadilla.
(Inverted plumb line mounted in the central block of Cernadilla Dam.)

mal a la superficie de cimentación de un bloque es (17):

$$\alpha = \frac{K_l \cdot M_b}{a^2 \cdot E_r} \quad (1)$$

donde K_l es un coeficiente adimensional, función de la relación de las longitudes de los lados del rectángulo, equivalente a la cimentación del bloque y del coeficiente de Poisson de la roca; M_b es el momento flector para una anchura unitaria del rectángulo equivalente; a es la longitud del rectángulo equivalente y E_r es el módulo de elasticidad de la roca de cimentación. Puede verse que α es inversamente proporcional a E_r , es decir, para un mismo valor de M_b en dos fechas distintas, la variación de α es una indicación segura de la variación de E_r entre esas fechas. Esto es fundamental para el control, a lo largo del tiempo, de las características mecánicas de la cimentación, tema que se trata en el apartado 7.

El giro es un reflejo de comportamiento global, por lo menos en toda la cimentación de un bloque; pero esto no ocurre con las deformaciones unitarias del macizo rocoso de cimentación. Las deformaciones unitarias, aunque hasta cierto punto también reflejan un comportamiento global, sin embargo, están muy influidas por circunstancias locales. Por eso, las mediciones de giros, juntamente con las medidas de deslizamientos en el plano de la cimentación, son probablemente las más adecuadas a la obtención de las características mecánicas de deformabilidad del macizo rocoso, a partir de los datos de auscultación. Este aspecto es, además, favorecido por la circunstancia de que las expresiones de Vogt son relaciones simples entre aquellas magnitudes y las características mecánicas de deformabilidad. Particularmente en los casos de presas de gravedad, con bloques independientes, para las cuales la fuerza total transmitida a la cimentación de un bloque se conoce fácilmente, aquellas mediciones son preferibles desde el punto de vista de obtención de valores de las características mecánicas del macizo rocoso a partir de los datos de auscultación y de su comparación con el valor obtenido por medio de ensayos *in situ* de deformabilidad. En conclusión, tales comparaciones permitirán que se juzgue la representatividad de los ensayos *in situ*.

Mediciones de giros con clinómetros móviles Galileo y Huggenberger con bases de medida de 800 y 1 000 mm., respectivamente, se han efectuado en la presa de Cambambe, en Angola. Esta técnica ha resultado costosa y de aplicación lenta, bien en el campo, bien en el trabajo de gabinete. Además, en muchos casos la precisión de medida conseguida es inadecuada, teniendo en cuenta la muy reducida magnitud de los giros que pueden ocurrir.

Es preferible el uso de fotoclinógrafos (18) en vez de clinómetros móviles, puesto que aquellos son de aplicación más económica y tienen grandes posibilidades en cuanto a una precisión adecuada a las medidas (19). Además, la utilización de fotoclinógrafos constituye un paso para la sustitución de las lecturas periódicas realizadas por operadores, por registros automáticos, continuos o no.

5. MEDICION DE DEFORMACIONES UNITARIAS

Las mediciones de deformaciones unitarias en el macizo rocoso de cimentación de presas portuguesas, hechas con extensómetros habitualmente utilizados en el hormigón, han indicado que, debido a la fracturación de la roca, medidas representativas tan sólo se obtienen con extensómetros de gran base de medida. Estos se han construido con longitudes de 2 y 3 metros.

El extensómetro (fig. 2), fundamentalmente, está constituido por un medidor de juntas Carlson al que está soldado una varilla de acero en un extremo. A la otra extremidad se suelda un disco de chapa de cobre, el cual constituye uno de los extremos de la envolvente exterior de protección. Esta está hecha de hoja de latón muy fina (0,2 mm. de espesor). La extremidad libre de la varilla es roscada. Una tuerca permite, por aprieto contra el otro extremo de la envolvente, tirar el conjunto medidor-redondo comprimiendo el tubo. Un pliegue reentrante, hecho en una sección próxima al extremo inferior del tubo envolvente, reduce considerablemente su rigidez longitudinal.

La determinación de las constantes de calibración (la mecánica y la de corrección de temperatura) exige el estudio del comportamiento del extensómetro. Para una longitud de 2 metros, la primera constante, generalmente,

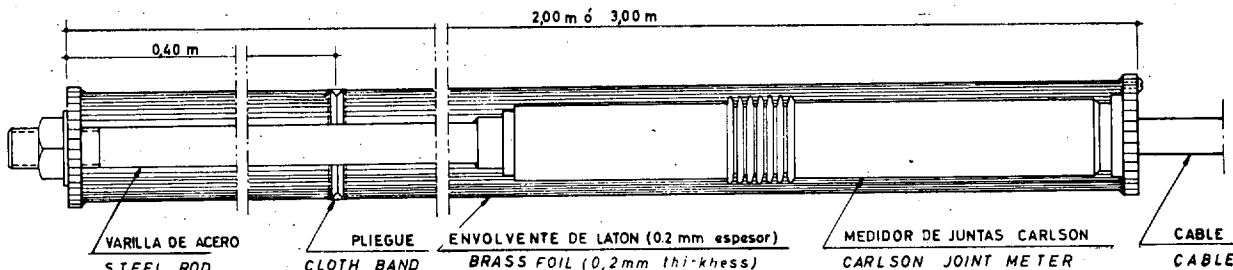


Fig. 2. — Extensómetro de cimentación (envolvente de latón seccionada).
(Strain meter for the foundation rock mass (brass foil is sectioned).)

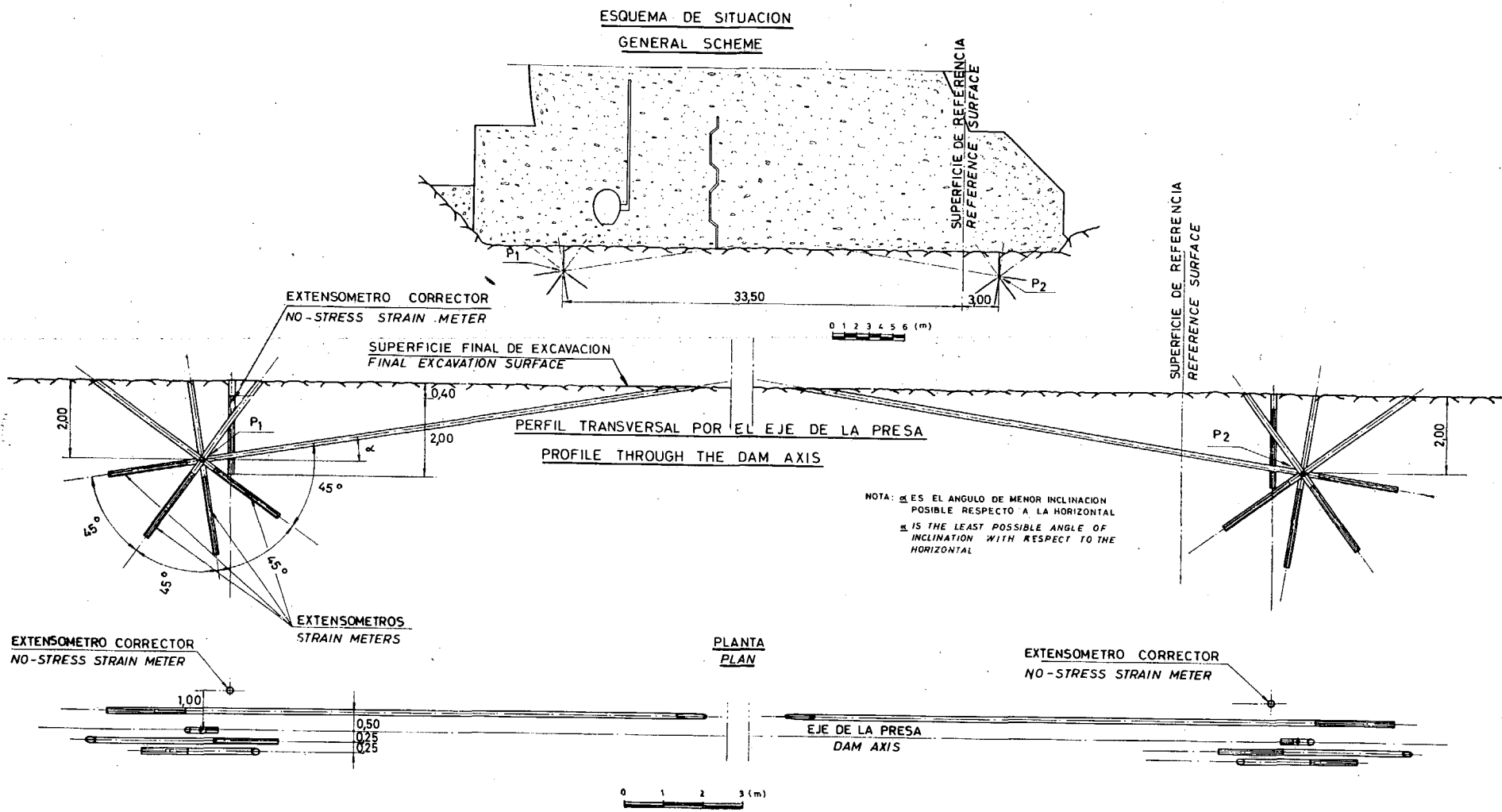


Fig. 3. — Localización de dos grupos de extensómetros para la roca en la cimentación del bloque central de la presa El Atazar.
(Locations of two groups of strain meters in the rock at the base of the central block of El Atazar Dam.)

varía entre $5,5 \times 10^{-6}$ y 7×10^{-6} por 0,01 por 100 de variación de la relación de resistencias del medidor de juntas, y la constante de corrección de temperatura es $10,5 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ si el valor del coeficiente de dilatación lineal de acero del redondo es $12 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$. El rango de medida efectivo del extensómetro es alrededor de $3\,000 \times 10^{-6}$, que es distribuido normalmente de modo que $1\,600 \times 10^{-6}$ correspondan a deformaciones unitarias de compresión, y $1\,400 \times 10^{-6}$ a deformaciones unitarias de tracción. Esta distribución sirve para cuando la cimentación está siendo inyectada dar al extensómetro la posibilidad de deformarse mucho, alargando o acortándose, sin sobrepasar los límites admisibles.

Estos extensómetros se están utilizando en grupos bidimensionales de cuatro extensómetros y grupos tridimensionales de seis. Los grupos bidimensionales se emplean cuando el estado de deformación es prácticamente plano, por ejemplo, en el plano axial de una presa bóveda, o en planos paralelos a los planos axiales de bloques de presas de gravedad. Los grupos tridimensionales se emplean cuando se desea estudiar un estado de deformación tridimensional, por ejemplo, en zonas de arranques de arcos de las presas bóveda, donde las tensiones de compresión

y de corte son mayores. Cuando tan sólo interesa el estudio de deformación en dos planos importantes, por ejemplo, en los planos radial y tangencial a diferentes cotas de la cimentación de una presa bóveda, se utilizan dos grupos bidimensionales con un extensómetro común (cinco extensómetros en total). La figura 3 indica la situación de dos grupos bidimensionales de extensómetros en la cimentación del bloque central de la presa de El Atazar. En esta presa (la figura 4 es una vista general de la margen derecha mostrando la excavación) se colocaron cuatro grupos tridimensionales más en la parte de aguas abajo, en la cimentación de cuatro bloques laterales simétricos.

Los taladros donde se colocan los extensómetros son, generalmente, de un diámetro de 7 u 8 cm. y se rellenan con lechada de cemento. Es necesario evitar que se corten dos taladros, para hacer sin dificultades la colocación de los extensómetros y de sus cables.

Cuando hay interés en calcular tensiones es imprescindible utilizar un extensómetro corrector que detecte las variaciones de longitud de la roca no causada por tensiones, es decir, variaciones de longitud debidas a variaciones térmicas, hidrométricas, u otras causas, como la



Fig. 4. — Vista general de la margen derecha de la presa El Atazar. Fotografía hecha en marzo de 1968, mostrando la excavación.

(General view of the right bank, El Atazar Dam, Spain, Photo taken March, 1968; showing the excavation.)

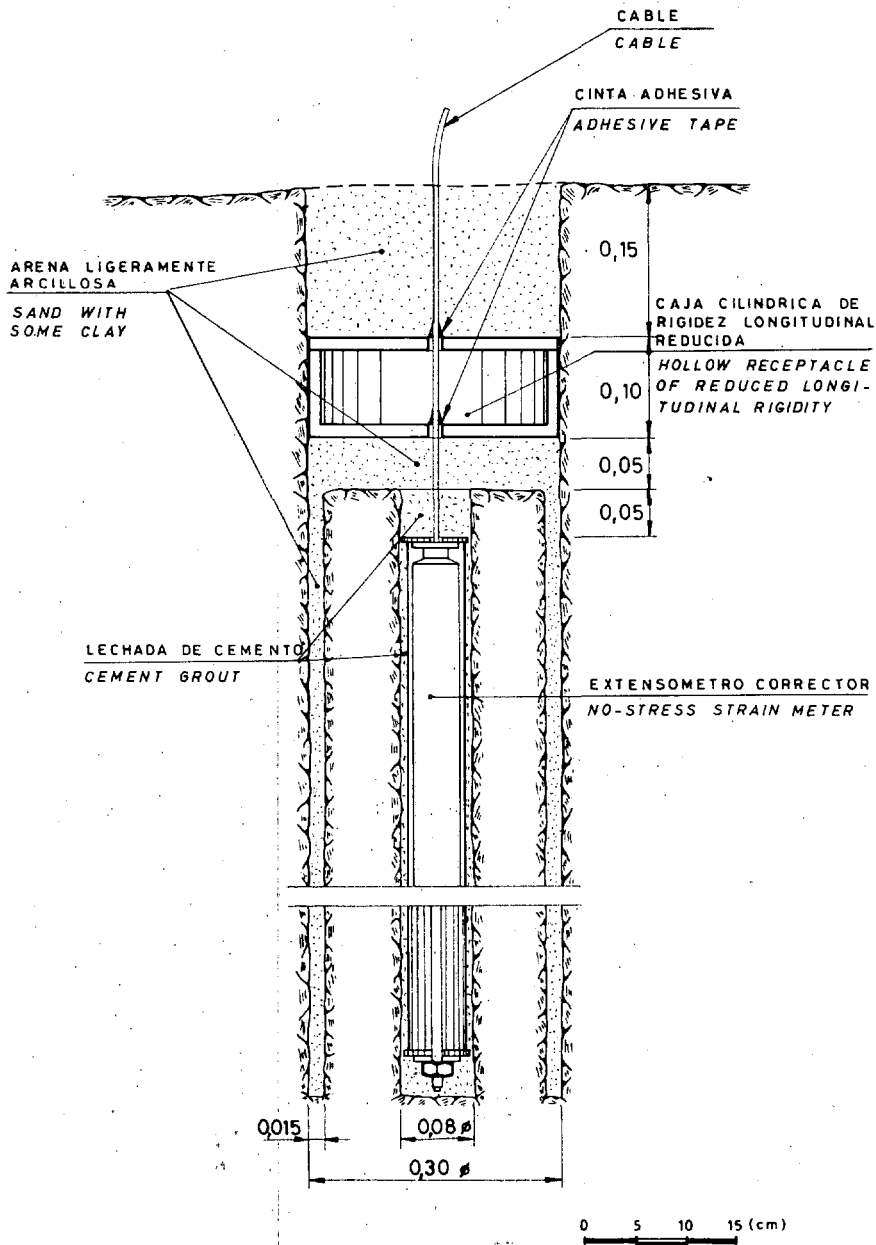


Fig. 5. — Montaje del corrector de un grupo de extensómetros para la roca.
 (Mounting of the no-stress strain meter for a group of rock strain meters.)

expansión de la roca debida a la decompresión. Se ha desarrollado una técnica adecuada para la colocación del extensómetro corrector. En la figura 5 se ve el montaje correspondiente. El extensómetro corrector se une con lechada a un cilindro de roca, libre del campo de tensiones. Para lograr esto, los espacios entre el cilindro de roca, la roca circundante y la superficie de cimentación, se llenan de arena fina un poco arcillosa, no penetrable por la lechada. Entre el cilindro de roca y la superficie de

cimentación se deja una caja cilíndrica, con paredes finas para que su rigidez longitudinal sea reducida, evitando de esta suerte la transmisión de tensiones de compresión a través de la arena.

En otros trabajos publicados (16), (20) y (21) se han presentado resultados obtenidos con extensómetros de gran base colocados en la cimentación de las presas de Alto Rabagão (Portugal) y Cambambe (Africa Occidental Portuguesa). Los resultados siguientes son particularmente

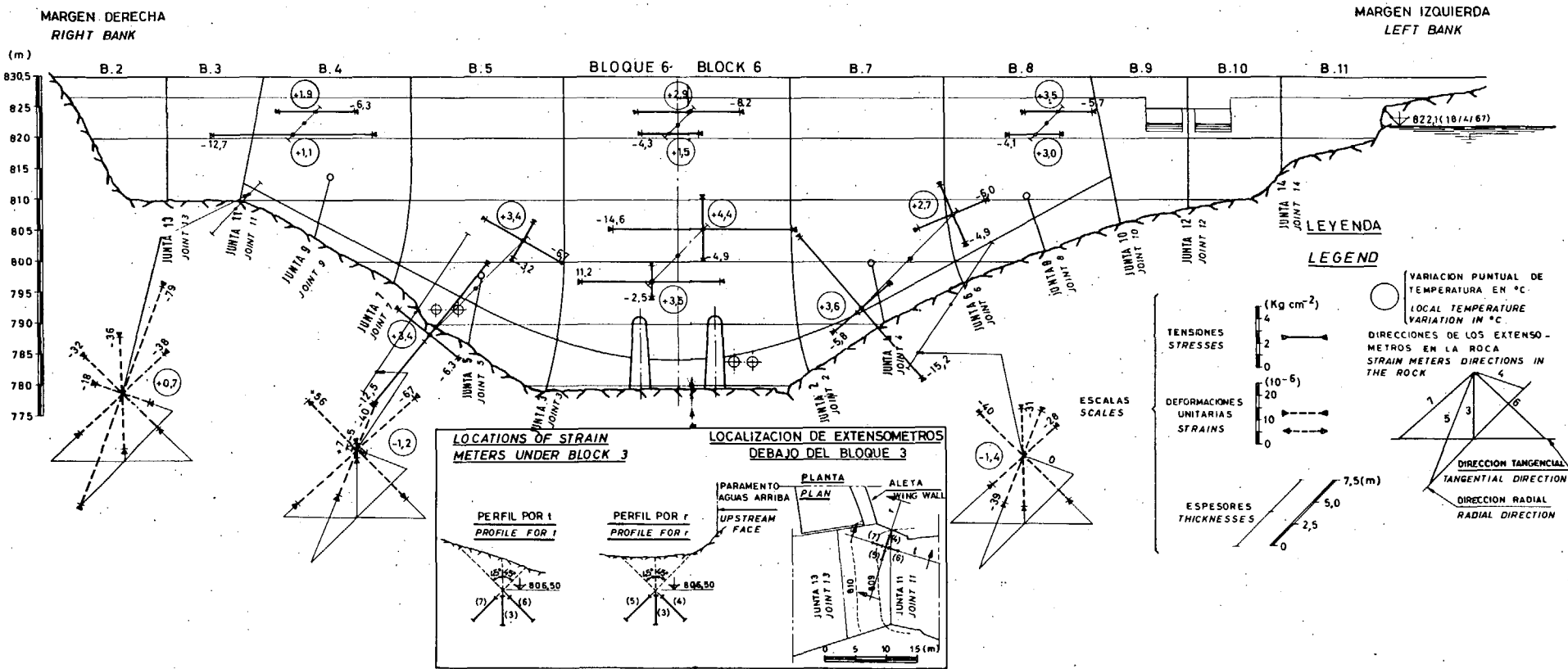


Fig. 6.— Tensiones en la bóveda y deformaciones unitarias en la cimentación de la presa de El Vellón, desarrolladas durante el período de la primera puesta en carga.

(Stresses in the dam and strains in the rock foundation of El Vellón Dam during the period of the first reservoir filling.)

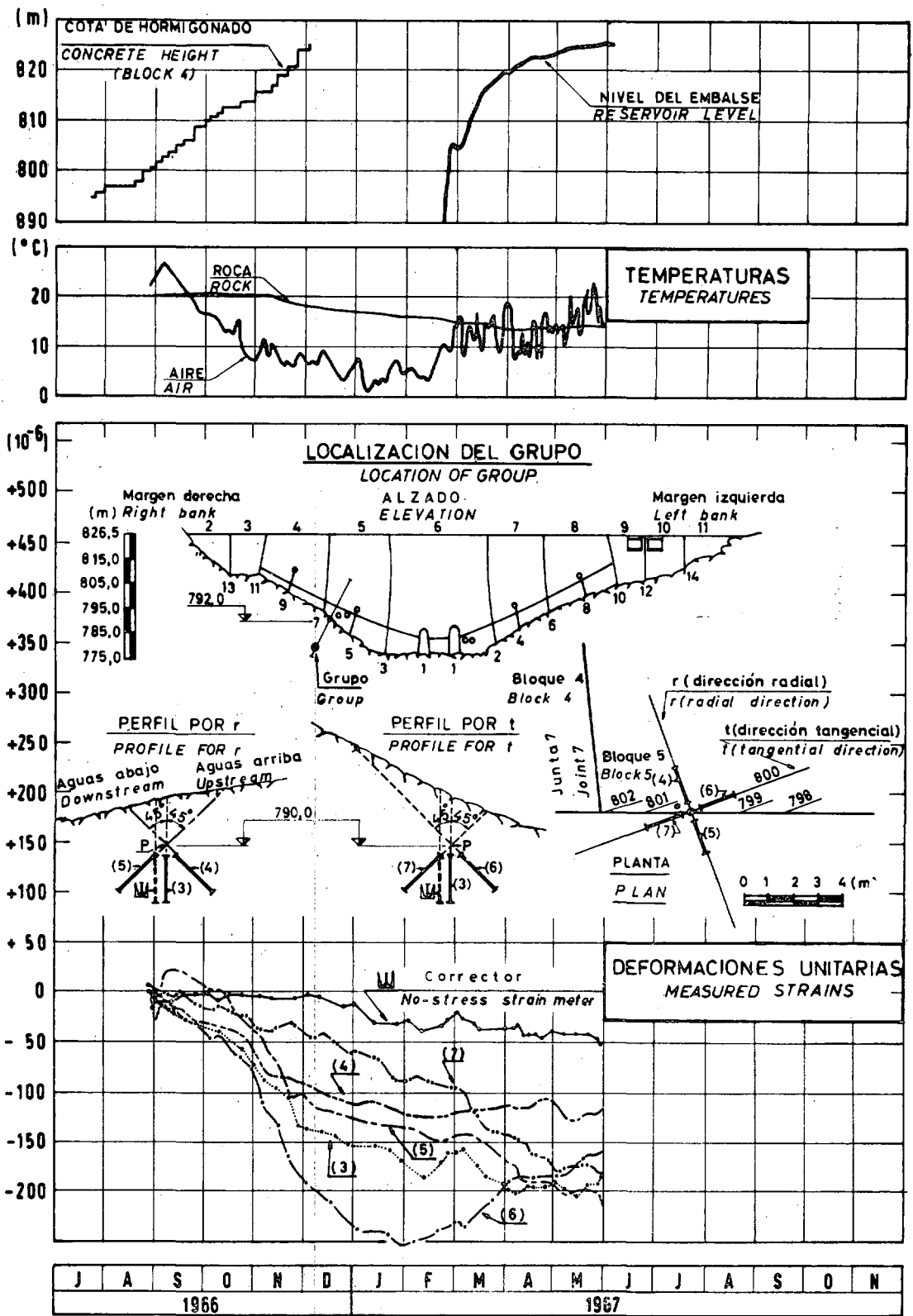


Fig. 7. — Deformaciones unitarias medidas en la cimentación del bloque 5 de la presa de El Vellón, durante los períodos de construcción y de primera puesta en carga.
(Measured strains in the foundation of block 5 of El Vellón Dam during the periods of construction and first reservoir filling.)

interesantes: 1.º La concordancia entre el orden de magnitud de los módulos de elasticidad obtenidos en los ensayos *in situ* y de los calculados a partir de las deformaciones unitarias medidas en la cimentación debidas al peso propio y a la carga hidrostática, en la zona de mayor deformabilidad de la presa de Alto Rabagão; 2.º El importante aumento del módulo de elasticidad con el peso propio, observado durante la construcción de la presa de Alto Rabagão en otra zona de la cimentación; 3.º La gran deformabilidad del macizo rocoso, que se abre, cierra y desliza a lo largo de las diaclasas mientras se realizan los trabajos de consolidación, como se observó en la presa de Cambambe (se midieron alargamientos de 1,5 mm. y acortamientos de 4 a 6 mm. en extensómetros de 2 m. de longitud).

En la figura 6 se presentan algunos resultados de la presa del Vellón, relativos a tensiones en la bóveda y deformaciones unitarias en la cimentación producidas durante el período de la primera puesta en carga. Los valores presentados se han calculado para el 18/4/67 (embalse a cota 822,1), con respecto a 21/2/67 (antes del inicio del llenado). El estudio de las tensiones en la bóveda demuestra que son concordantes con las variaciones de estado térmico y de carga hidrostática habidas entre aquellas fechas (22). Respecto a las deformaciones unitarias en la roca correspondientes a los grupos situados debajo de los bloques 5 y 7, su magnitud relativa es la que se esperaba, es decir, las mayores deformaciones unitarias siguen la dirección del plano radial que buza 45º hacia aguas abajo (dirección 5) y las direcciones normales a las laderas en el plano tangencial (dirección 6 de la margen izquierda y 7 en la derecha). En cuanto al grupo situado cerca del pie de aguas arriba del bloque 3, las magnitudes relativas de las deformaciones unitarias parecen estar también en concordancia con las fuerzas transmitidas al bloque: carga hidrostática, empuje de la aleta y empuje de los arcos superiores de la bóveda.

En la figura 7 se presentan los diagramas de las deformaciones unitarias medidas en el grupo situado debajo del bloque 5 de la presa del Vellón. En los diagramas correspondientes a los extensómetros activos se refleja bien la acción del peso propio y de la carga hidrostática durante la primera puesta en carga.

Se piensa que el conjunto de resultados ya existentes de mediciones de deformaciones unitarias en cimentaciones de presas con extensómetros de gran base, tiene la calidad suficiente para demostrar que las técnicas desarrolladas son eficaces y útiles. En las cimentaciones de las presas españolas de Almendra, Cernadilla y El Atazar hay colocados varios grupos de extensómetros de gran base.

6. MEDICION DE DESLIZAMIENTOS

No es preciso resaltar la importancia, para el control de la seguridad de una presa, que tiene la medición de los deslizamientos en su cimentación, especialmente en las superficies de discontinuidad.

Para medir deslizamientos se utilizaron varios dispositivos en la presa de Cambambe, con objeto de ganar experiencia en este tipo de mediciones. Se presentan en la figura 8 dos dispositivos adecuados.

El primero de ellos es semejante a un dispositivo utilizado por la Ontario Hydroelectric Power Commission (23). Consiste en colocar, en cada una de las dos direcciones normales entre sí, un medidor de juntas Carlson en serie con un muelle, conjunto este que se fija por uno de sus extremos a un pequeño pilar de hormigón moldado sobre la superficie de posible deslizamiento y, por el otro extremo, al hormigón del bloque o al hormigón que rellena una falla o diaclasa. Al montar el dispositivo hay que tomar cuidados especiales para impedir que se estropee con las inyecciones del macizo rocoso.

Varios ensayos han sido hechos para estudiar el comportamiento de los medidores de juntas cuando son sometidos a ciclos de carga-descarga dentro del rango de medida garantizado por el fabricante. Los ciclos carga-descarga han sido de duración variable, alcanzándose una duración de hasta dos meses y medio. Estos ensayos se hicieron con objeto de obtener: 1.º Las características de deformabilidad de los medidores de juntas; 2.º La comprobación de su buen funcionamiento cuando se sometieran a condiciones semejantes a las de operación, es decir, estirados hasta casi su máxima apertura. Además, se hicieron ensayos para determinar las características mecánicas de los muelles especialmente estudiados para este fin.

El rango de medida de los dispositivos utilizados en la presa de Cambambe fue 5,5 cm. Para disminuir o aumentar el rango, basta modificar las características del muelle a utilizar. Por ello, este dispositivo es adecuado cuando los deslizamientos pueden ser de muchos centímetros. En algunas discontinuidades de la cimentación de la presa de Almendra (fig. 9) se han colocado dispositivos de este tipo con un rango de medida de 10 cm.

El segundo dispositivo consiste en colocar, en cada una de dos direcciones normales entre sí, un medidor de juntas Carlson tipo JL-10, con un rango de medida de 1,2 centímetros, el cual se fija por un extremo a un redondo de acero (fijo a su vez a la superficie de deslizamiento) y por el otro extremo al hormigón. Generalmente, las direcciones normales entre sí corresponden a la horizontal y a la línea de máxima pendiente de la superficie de discontinuidad. Para proteger el dispositivo durante las inyecciones del macizo rocoso, se rodea de arena fina contenida en una caja de hoja metálica.

Este segundo dispositivo, de montaje más sencillo que el primero, es conveniente utilizarlo cuando el deslizamiento a controlar se prevé sea pequeño. Cuando el sentido de deslizamiento se conoce de antemano, sea cual fuere el dispositivo escogido, conviene poner en correspondencia con aquel sentido el máximo posible del rango de medida del medidor de juntas.

Se supone que estos dos dispositivos satisfarán los fi-

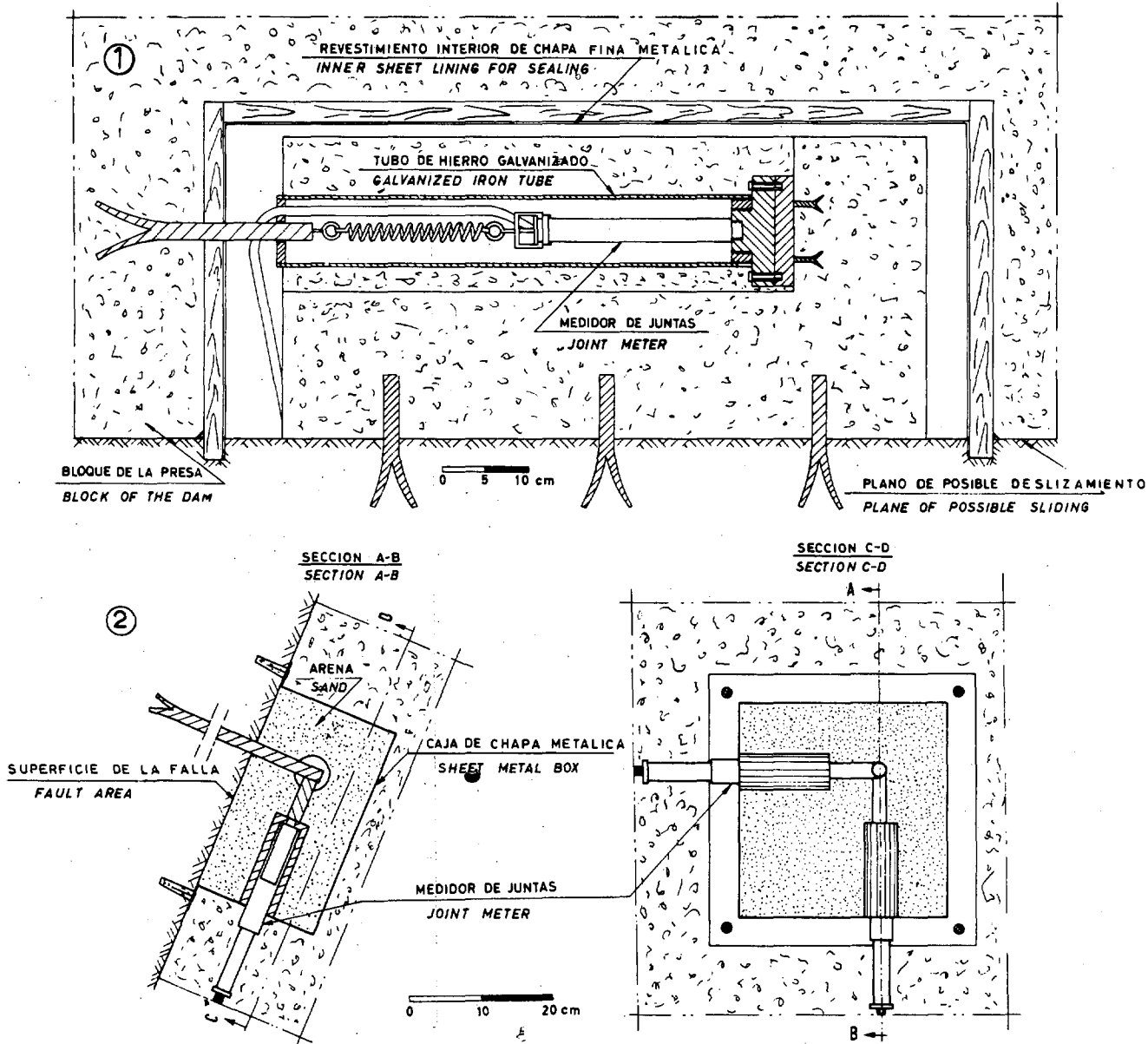


Fig. 8. — Dispositivos usados para la medición de deslizamientos entre el hormigón y el macizo rocoso; 1. En la superficie de cimentación de un bloque. 2. En superficies de fallas con relleno sustituido por hormigón.

(Devices used for measuring slidings between the concrete and the rock mass: 1. In the foundation surface under the base of a block. 2. In surfaces of concrete-filled faults.

nes en vista. En trabajo ya mencionado (16) se presentaron algunos resultados, relativos a la presa de Cambarne, de medidas de deslizamientos.

7. CONTROL, A LO LARGO DEL TIEMPO, DE LAS CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS MACIZOS ROCOSOS DE CIMENTACION

El conocimiento de la evolución, a lo largo del tiempo, de las características mecánicas de los macizos rocosos de cimentación es aspecto del máximo interés para el

control de la seguridad de las presas. Ello permite obtener indicaciones sobre si los macizos rocosos de cimentación mantienen las características deseadas, o si dichas características empeoran con el tiempo. Si empeoran, las observaciones ayudarán a determinar el mejor momento para realizar trabajos de consolidación y las zonas que más los necesitan.

Este control puede hacerse a través de mediciones de la velocidad de propagación del sonido en los macizos rocosos, mediante ensayos sísmicos. En efecto, midiendo

las velocidades de propagación del sonido es posible obtener los módulos de elasticidad dinámicos de las distintas zonas de la cimentación. Estos módulos, aunque sus valores no tienen una relación bien definida con la efectiva deformabilidad del macizo rocoso, son del máximo interés cuando se analizan sus variaciones con el tiempo. Estas variaciones permiten conocer cómo cambian con el tiempo las características mecánicas de la cimentación, aunque sólo sea cualitativamente.

Si se quieren obtener los verdaderos módulos de elasticidad, es decir, si se quiere evaluar cuantitativamente su variación con el tiempo, entonces se cree que es preferible medir los giros de la base de los bloques, siguiendo lo señalado en el apartado 4. En efecto, la ecuación [1] muestra que el inverso del giro varía linealmente con el módulo de elasticidad, mientras que es el cuadrado de la velocidad de propagación del sonido que varía linealmente con el módulo dinámico de elasticidad. De ello, se deduce que el giro de la base de los bloques es más sensible a las variaciones de la deformabilidad de la cimentación

que la velocidad de propagación del sonido. Teniendo en cuenta la simplicidad de la medición de giros respecto a los ensayos sísmicos y que además aquellas mediciones no requieren personal muy cualificado, puede concluirse que el control de las características de deformabilidad de las cimentaciones puede obtenerse de una manera más simple, más exacta, más frecuente y más económica a través de mediciones de giros que por ensayos sísmicos. Sin embargo, esto no quita interés a la realización de ensayos sísmicos, especialmente cuando se emplea para controlar zonas débiles de la cimentación, bien definidas, y que han sido objeto de tratamientos especiales.

En lo concerniente a la evaluación de la eficacia de los tratamientos se puede decir que los ensayos sísmicos son muy útiles para la obtención de información comparativa de las condiciones de la cimentación, inmediatamente antes y después de los tratamientos de consolidación. En la presa de Cambambe se realizaron ensayos sísmicos con tal fin. También se han hecho estos ensayos con objeto de controlar la variación de las características del macizo rocoso de la cimentación con el tiempo.



Fig. 9. — Vista general de la margen derecha de la presa de Almendra. Fotografía hecha en diciembre de 1967, mostrando la excavación, los bloques del estribo y los bloques de la bóveda en el cauce.

(General view of the right bank, Almendra Dam, Spain. Photo taken December, 1967, showing the excavation, the abutment blocks, and the blocks of the arch dam in the stream bed.)

8. OBERVACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA CIMENTACION DURANTE EL PERIODO DE CONSTRUCCION DE UNA PRESA

Teóricamente casi todas las técnicas mencionadas en los apartados anteriores servirían para este propósito. Durante el período de construcción es muy difícil, si no imposible, utilizar en la práctica algunas de aquellas técnicas, especialmente mediciones de desplazamientos por métodos geodésicos o con péndulos invertidos y mediciones de giros. Los trabajos normales de construcción y la utilización de galerías para distintos fines, son prácticamente incompatibles con aquellas mediciones.

Sin embargo, son importantes las observaciones de las deformaciones y de los desplazamientos de la cimentación durante la construcción, a causa de los efectos consiguientes sobre los bloques. Por ello, se aconseja que, durante el período de construcción, se haga un análisis de la información proporcionada por los extensómetros y medidores de juntas colocados en el hormigón de los bloques. Particularmente los medidores de juntas se han mostrado muy útiles para detectar algún comportamiento inesperado o anormal de la cimentación. De hecho, una gran deformabilidad de alguna zona de la cimentación o un deslizamiento en una superficie de discontinuidad, tiene repercusión inmediata en las juntas que delimitan los bloques afectados, por lo que los medidores de juntas detectan de inmediato aquellas anomalías.

La relativa facilidad con que los medidores de juntas detectan cualquier deformación anormal de la cimentación, induce a recomendar que, en el plan de auscultación, la distribución de los medidores de juntas debe hacerse teniendo esto en cuenta. Por eso, en los más recientes planes de auscultación los autores han tenido siempre la preocupación de aumentar el número de aquellos aparatos en los compartimientos inferiores de las juntas.

Cuando el número de medidores de juntas es suficiente, es fácil comprender los movimientos anormales de las juntas y su relación con las causas. Si el número de medidores de juntas es reducido, siempre que haya alguna anomalía en la apertura o cierre de una junta, conviene complementar inmediatamente las observaciones. Esto se logra generalmente mediante mediciones superficiales de los movimientos relativos de los bloques, en puntos de intersección de la junta con las galerías o con los paramentos de la presa.

En trabajo ya mencionado (16) se presentan algunos resultados interesantes de comportamiento inesperado de juntas, a causa de deformaciones anormales de la cimentación. Las causas siempre fueron detectadas. En presas actualmente en construcción se están obteniendo resultados de este tipo muy interesantes.

9. CONCLUSIONES

El comportamiento del macizo rocoso que constituye la cimentación de una presa es uno de los aspectos menos conocidos, pero de la mayor importancia en el pro-

yecto de una presa y en el control de su seguridad. Para un mejor conocimiento del comportamiento mecánico de la cimentación de las presas debe dedicarse mayor atención y esfuerzo al estudio de los datos de la auscultación. En efecto, en definitiva es mediante la auscultación como se conoce su verdadero comportamiento y que, por tanto, se tiene la posibilidad de juzgar su seguridad.

En la auscultación de cimentaciones de presas son de la máxima importancia los aspectos indicados a continuación: nuevas técnicas de auscultación y el perfeccionamiento de las ya existentes; amplia utilización de estas técnicas; estudio y análisis de los datos de auscultación, y la comparación de la información así obtenida con la de los cálculos, ensayos en modelo, ensayos *in situ* y estudios teóricos.

Entre los métodos geodésicos hasta ahora utilizados para medir desplazamientos, el método de la poligonación es el mejor para medir los desplazamientos horizontales de las presas y de sus cimentaciones. En efecto, dicho método, permite una mayor exactitud, una más rápida observación de mayor número de puntos y una total independencia de las condiciones atmosféricas, por lo que se hace más conveniente que el método de triangulación. Entonces, cuando en el proyecto de una presa las galerías horizontales penetran en la cimentación, se recomienda proyectarlas de suerte que se pueda utilizar el método de la poligonación. Este método puede conjugarse con nivelaciones de precisión para obtener también la componente vertical de los desplazamientos de los puntos observados.

Actualmente se intenta utilizar menos los métodos geodésicos, sustituyéndolos por péndulos invertidos. En efecto, los péndulos invertidos dan lugar a mediciones de desplazamientos más rápidas y más fáciles, requieren poco trabajo de gabinete y no exigen personal altamente calificado. Además de los desplazamientos horizontales, los péndulos invertidos permiten obtener la componente vertical de los desplazamientos. Aquella componente se mide actualmente por nivelación entre escalillas de invar colocadas sobre los hilos de los péndulos invertidos y otras colocadas en la roca o en el hormigón de las bases de los bloques. La construcción de un coordinómetro que permitiera la medición de la componente vertical de los desplazamientos evitaría la nivelación, por lo que simplificaría las mediciones.

Las mediciones de giros son de gran importancia, pues complementan las mediciones realizadas con los péndulos. Además, desde el punto de vista de la seguridad, la medición del giro α de la base de los bloques es fundamental para el control de las características mecánicas del macizo rocoso de cimentación a lo largo del tiempo. En efecto, α es inversamente proporcional al módulo de elasticidad de la cimentación. Para la medición de giros es preferible el uso de un fotoclinógrafo que un clinómetro móvil, ya que los fotoclinógrafos tienen mayores posibilidades en cuanto a una mayor precisión en las medidas y, además, suministran registros automáticos.

Se han construido y utilizado extensómetros con base de medida de 2 y 3 metros, para medir deformaciones unitarias en los macizos rocosos. Los extensómetros se han utilizado en grupos bi y tridimensional, de acuerdo con el estado de deformación en las zonas donde se han emplazado. Para la colocación de los extensómetros, incluyendo el corrector, se ha desarrollado una técnica adecuada. Los resultados obtenidos a través del análisis de las deformaciones unitarias medidas en la cimentación de presas son de calidad suficiente como para demostrar la gran utilidad de las técnicas desarrolladas.

Para medir deslizamientos en cimentaciones de presas, especialmente en las superficies de discontinuidad, parecen ser adecuados los dispositivos que se están usando. Uno de ellos se emplea cuando se desean controlar deslizamientos hasta un centímetro. El otro se usa cuando los deslizamientos previstos pueden alcanzar varios centímetros, pudiendo incluso aplicarse para la detección de deslizamientos de algunos decímetros.

El control, a lo largo del tiempo, de las características mecánicas de los macizos rocosos de cimentación, puede obtenerse con medidas de la velocidad de propagación del sonido, mediante ensayos sísmicos. Sin embargo, este control puede obtenerse de una forma más fácil, más exacta y más económica midiendo giros. Por tanto, desde el punto de vista de obtención de la variación de los módulos de elasticidad con el tiempo, es preferible obtenerlos midiendo los giros de las bases de los bloques. Los ensayos sísmicos son de gran valor cuando se utilizan para controlar zonas débiles bien definidas, que hayan sido objeto de un tratamiento especial.

Generalmente, los trabajos normales de construcción son incompatibles con la aplicación de técnicas de medición de desplazamientos, es decir, con las técnicas que permitirían observar el comportamiento de la cimentación durante el período de construcción. La experiencia ha demostrado que un análisis cuidadoso hecho sobre los datos suministrados por los medidores de juntas revela cualquier comportamiento inesperado de la cimentación, ya que tal comportamiento afecta de inmediato a los bloques y, por tanto, a las juntas. Por ello, se recomienda que en lo concerniente al estudio de la distribución de los medidores de juntas en un plan de auscultación éste se conciba teniendo en cuenta aquella realidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Confederación Hidrográfica del Tajo, al Canal de Isabel II y a Iberduero, las oportunidades dadas a Consulpresa de colaborar en los trabajos de auscultación de las presas de El Atazar, Vellón, Almen-dra y Cernadilla.

1. GUERREIRO, M.; WILSON, y SERAFIM, J. L.: "Deformability tests and some results from three Spanish dam sites", Proc. International Symposium on Rock Mechanics, Tema I; Informe 3, Madrid, octubre 1968.
2. OBERTI, G.: "Results and interpretation of measurements made on large dams of all types, including earthquake observations", Trans. VIIIth Congress on Large Dams, vol. IV, General Report, Cuestión número 29, págs. 395-433, Edinburg, 1964.
3. BOURGIN, A.: "Sécurité des barrages du point de vu de la fondation et stabilité des versants de la retenue", Trans. IXth Congress on Large Dams, volumen V, General Report, Cuestión núm. 32, páginas 1-39, Istanbul, 1967.
4. BUEHLER, J. P.: "Behaviour and deterioration of dams", Trans. IXth Congress on Large Dams, volumen V, General Report, Cuestión núm. 34, páginas 129-175, Istanbul, 1967.
5. SERAFIM, J. L., y DEL CAMPO, A.: "Interstitial pressures on rock foundations of dams", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 91, núm. SM5, Proc. Paper 4484, páginas 65-85, septiembre 1965.
6. SERAFIM, J. L.; DEL CAMPO, A.; GUERREIRO, M., y UREÑA, RAFAEL DE: "Aspects of the percolation of water under concrete dams and the deformation of rock foundations", Trans. IXth Congress on Large Dams, vol. V, Comunicación 7, págs. 381-406, Istanbul, 1967.
7. ROCHA, M.; SERAFIM, J. L.; SILVEIRA, A. F., y GUERREIRO, M.: "Observation of concrete dams. Results obtained in Cabril Dam", Trans. VIth Congress on Large Dams, vol. II, Cuestión núm. 21, Informe 83, págs. 877-923, New York, 1958.
8. ROCHA, M.; SERAFIM, J. L.; SILVEIRA, A. F., y RODRIGUES, O. V.: "The observation of the behaviour of the Portuguese concrete dams", Trans. Vth Congress on Large Dams, vol. IV, Comunicación 33, páginas 1219-1264, París, 1955.
9. RODRIGUES, O. V.: "Mesure des déplacements absolus des grands barrages portugais", Symposium on the Observation of Structures, vol. II, Comunicación 38, págs. 649-675, Lisboa, 1955.
10. BACHMANN, W. K.: "Nouvelles méthodes pour la détermination géodésique des déformations de barrages et autres ouvrages d'art", Cours d'eau et énergie, núms. 7-9, Zurich, 1956.
11. LEMOS, A. F. DE: "Sur l'emploi de nivellements géométriques de précision dans l'observation d'ouvrages", Symposium on the Observation of Structures, vol. II, Comunicación 39, págs. 676-685, Lisboa, 1955.

12. ROCHA, M., y SILVEIRA, A. F. DA: "Assessment of observation techniques used in Portuguese concrete dams", Trans. VIIIth Congress on Large Dams, vol. II, Cuestión núm. 29, Informe 42, páginas 757-790, Edinburgh, 1964.
13. XEREZ, A. C.; LAMAS, A. F., y CARDOSO FERREIRA, C.: "La mesure des déplacements dans le contrôle du comportement des barrages en béton", Trans. VIIIth Congress on Large Dams, volumen II, Cuestión núm. 29, Informe 26, págs. 453-470, Edinburgh, 1964.
14. SCHUM, C.: "Comportment des grands barrages suisses", Introduction, Ed. Comité National Suisse des Grands Barrages, págs. 13-16, 1964.
15. SILVEIRA, A. F. DA: "Observation of dams displacements by means of pendulums", Symposium on the Observation of Structures, vol. II, Comunicación 35, págs. 588-601, Lisboa, 1955.
16. GUERREIRO, M.: "Observation of the behaviour of Cambambe Dam. Experience and some results obtained", Trans. VIIIth Congress on Large Dams, volumen V, Comunicación 18, págs. 623-670, Edinburgh, 1964.
17. NAVARRO, J. L. G., y ARACIL, J. J.: "Saltos de agua y presas de embalse", vol. II, 3.^a ed., Tipografía Artística, Madrid, 1958.
18. CALOI, P., y DIAMANTI, E. D.: "Il fotoclinografo a pendolo orizzontale nella teoria e nell'applicazione", L'Energia Elettrica, núm. 10, octubre 1956.
19. TONINI, D.: "Observed behaviour of several Italian arch dams", Proc. ASCE, Journal Power Division, volumen 82, núm. P06, diciembre 1956.
20. ROCHA, M.; SILVEIRA, A. F. DA; RODRIGUES, O. V., y FLORENTINO, C.: "Assessment of the behaviour of a large dam during its first loading", Trans. IXth Congress on Large Dams, vol. III, Cuestión 34, Informe 23, págs. 403-418, Istanbul, 1967.
21. SERAFIM, J. L.: "The behaviour of arch dams and their foundations", Water Power, núm. 5, págs. 199-207, mayo 1964.
22. AUGUSTIN, J. G., y SERAFIM, J. L.: "Presa del Vellón", Revista de Obras Públicas, núm. 3028, páginas 717-728, agosto 1967.
23. GUNG, G., y MORISON, W. B.: "Structural behaviour of concrete gravity dams", Ontario Hydro Research News, vol. VI, núm. 2, abril-junio 1954.